

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

KATEDRA MATERIÁLU A TECHNOLOGIÍ PRO AUTOMOBILY



Metodika měření mechanických vlastností kompozitů

METHODOLOGY FOR MEASURING MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE:

AUTHOR

ONDŘEJ MELICHAŘÍK

VEDOUCÍ PRÁCE:

SUPERVISOR

Ing. MICHAL BURÁŇ

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálů a technologií pro automobily

Zadání bakalářské práce

Student: Ondřej Melichařík
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl
Téma: Metodika měření mechanických vlastností kompozitů
Methodology for measuring mechanical properties of composite materials
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh metodiky zkoušení kompozitních materiálů dle norem pro zkoušení kompozitních materiálů.

V rámci zadání vypracujte:

- Stručný úvod do problematiky kompozitních materiálů a vyhodnocování jejich zkoušek
- Vytvořit normativní základnu
- Analýzu současného řešení problematiky
- Návrh metodiky zkoušení

Seznam doporučené odborné literatury:

ČASENSKÝ, M. Metodika konstruování. 1. vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT Praha, 1990. 122s.

ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma s strukturou. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32s.

Laš, V.: Mechanika kompozitních materiálů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273-X

Ashby, M. F.: Materials Selection in Mechanical Design. 3. vyd. ButterworthHeinemann, 2005. ISBN 0-7506-6168-2

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Burán**

Datum zadání: 30.11.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou práci (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám.

Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

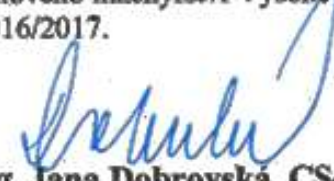
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2016/2017.

Ostrava 2. 11. 2016


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

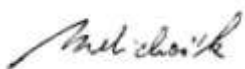
PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě 21. 4. 2016



.....

ONDŘEJ MELICHAŘÍK

ABSTRAKT

Obsahem této práce jsou metody mechanického testování kompozitních materiálů. Začátek je věnován kompozitním materiálům obecně. Jde hlavně o definování kompozitu, jeho rozdělení, vlastnosti, výrobu a použití. Další část práce se zabývá jednotlivými metodami na zkoušení mechanických vlastností kompozitů. Zejména postup zkoušek a jejich výsledky. Následuje část věnována současnému řešení problematiky v konkrétní společnosti zabývající se užitím kompozitních dílů pro své výrobky a jejich testování. V další části je pro konkrétní kompozitní část vybrán postup měření. V závěru práce je obecně shrnuta problematika mechanického testování kompozitů.

KLÍČOVÁ SLOVA: kompozitní materiál, mechanické vlastnosti, měření, vzorek

ABSTRACT

The content of this work are methods of mechanical testing of composite materials. The beginning is dedicated to composite materials in general. It is mainly about defining the composite, its distribution, properties, production and use. Another part deals with individual methods for testing the mechanical properties of composites. In particular, the test procedure and its results. The following part is devoted to the current solution of the problem in a particular company dealing with the use of composite parts for their products and their testing. In the next section, a measurement procedure is selected for a particular composite part. At the end of the thesis is summarized the problems of mechanical testing of composites.

KEYWORDS: composite material, mechanical properties, measurement, specimen

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MELICHAŘÍK, O. Metodika měření mechanických vlastností kompozitů. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství 2017. 53s. Vedoucí práce Ing. Michal Buráň.

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych velice rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Michalu Buráňovi za konzultace, odborné vedení a doporučení při vypracování této práce.

Obsah

Úvod	4
1. Kompozitní materiály	5
1.1. Mikrokompozity	5
1.2. Makrokompozity	5
1.3. Nanokompozity	5
2. Rozdělení kompozitních materiálů	6
2.1. Rozdělení dle typu matrice	6
2.1.1. Matrice	6
2.1.2. Polymerní matrice	6
2.1.3. Kovová matrice	6
2.1.4. Keramická matrice	6
2.1.5. Uhlíkové a skleněné matrice	7
2.2. Rozdělení dle tvaru zpevňující fáze	7
2.2.1. Zpevňující fáze	7
2.2.2. Částečné výztuže	8
2.2.3. Vláknové výztuže	9
3. Vláknové kompozity	10
3.1. Skleněná vlákna	10
3.1.1. Vlastnosti skleněných vláken	10
3.1.2. Výroba skleněných vláken	11
3.2. Aramidová vlákna	11
3.2.1. Vlastnosti aramidových vláken	12
3.2.2. Výroba aramidových vláken	13
3.3. Uhlíková vlákna	13
3.3.1. Vlastnosti uhlíkových vláken	13

3.3.2.	Výroba uhlíkových vláken.....	14
4.	Technologie výroby kompozitních materiálů	16
4.1.	Ruční kladení	16
4.2.	Lisování.....	16
4.3.	Tažení.....	17
5.	Použití kompozitních materiálů	18
5.1.	Použití v letectví	18
5.2.	Použití v lodním průmyslu.....	19
5.3.	Použití v automobilovém průmyslu	20
6.	Metody měření mechanických vlastností laminátů	22
6.1.	Použité normy pro mechanické testování kompozitních materiálů	23
6.1.1.	Značení normy ASTM.....	23
6.2.	Vybrané americké normy ASTM.....	24
6.3.	Tahová zkouška (ASTM D3039/D3039 M-14)	25
6.4.	Tlaková zkouška (ASTM D695-15)	26
6.5.	Tříbodová ohybová zkouška (ASTM D790-15)	27
6.6.	Čtyřbodová ohybová zkouška (ASTM D6272-10).....	29
6.7.	Tahová zkouška (ASTM D7291/ D7291 M-15).....	29
6.8.	Ohybová zkouška (ASTM D6415-06).....	30
6.9.	Ohybová zkouška krátkého nosníku (ASTM D2344-16)	31
6.10.	Rovinná smyková zkouška (ASTM D3518/ D3518 M-94)	32
6.11.	Kolejnicové zkoušky (ASTM D4255)	33
6.12.	Iosipescova zkouška (ASTM D5379-12).....	34
6.13.	Zkouška laminátu s otvorem (ASTM D5766).....	37
6.14.	Návrh metodiky zkoušení.....	38
6.14.1.	Návrh a postup zkoušení.....	39
7.	Současné řešení problematiky	40

7.1. Boeing 737	40
7.2. Boeing 777	40
7.3. Boeing 787 Dreamliner.....	41
7.4. Používané metody mechanického testování	42
7.5. Lamborghini Aventador.....	43
7.6. Používané metody mechanického testování	44
Závěr	45
Seznam použité literatury	46
Seznam obrázků.....	50
Seznam tabulek.....	52
Seznam použitých zkratk a symbolů	53

Úvod

Kompozitní materiály jsou poměrně novějším typem materiálů, které se dnes využívají v různých technických odvětvích stále častěji. Děje se tak hlavně z toho důvodu, že na rozdíl od klasických kovových materiálů jsou mnohem lehčí a přesto mají srovnatelné, nebo i vyšší mechanické vlastnosti. V poslední době se toho hojně využívá například v automobilovém průmyslu k výrobě karoserií pro odlehčení vozidla, leteckém průmyslu atd. Právě díky rozsáhlému použití kompozitů má za následek vznik velkého množství zkušebních metod.

Zkoušky mechanických vlastností jsou velmi důležité pro všechny druhy materiálů, u kterých se předpokládá vyšší statické, nebo dynamické namáhání. Díky těmto zkouškám můžeme potvrdit, nebo naopak vyvrátit vhodnost jednotlivých materiálů pro konkrétní použití. U kompozitních materiálů jsou tyto zkoušky snad ještě důležitější, zvláště díky specifickým vlastnostem, které tento typ materiálů má. Bavíme se zejména o anizotropii, tedy o tom, že má materiál v každém směru jiné vlastnosti. Výsledky zkoušek může také použít prodejce, jako druh ověření vlastností materiálu a může tak bez starostí deklarovat určitou kvalitu.

Zkoušky mechanických vlastností kompozitních materiálů podléhají různým normám. Technické normy stanovují základní požadavky na kvalitu a bezpečnost. V této práci budou uvedeny zejména normy ASTM- Americké technické normy. Společnost ASTM International je jednou z největších nezávislých organizací pro rozvoj norem ve světě - spolehlivý zdroj technických norem pro materiály, výrobky, systémy a služby.

1. Kompozitní materiály

Kompozitní materiály mají spoustu definic. Uvedme si například tuto: „*Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá se matrice*” [1].

Dle současného chápání termínu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi ty kompozitní splněny tyto následovné podmínky:

- Podíl výztuže musí být minimálně 5% a víc.
- Vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, chemické a fyzikální) se liší, výztuž je pevnější v tahu a je obvykle tužší než matrice.
- Kompozit musí být připraven smícháním složek.

Podle těchto výše uvedených podmínek nelze za kompozit považovat například plast, obsahující malé množství tuhých barviv, nebo oxidů ani slitin kovů, ve kterých se vlivem ochlazování vyloučily tvrdé fáze [1].

1.1. Mikrokompozity

Největší příčné rozměry výztuže (délka částice, nebo průměr vlákna) jsou v rozmezí 10^0 až 10^2 μm . V porovnání s kovovými materiály mají mikrokompozity menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě [2].

1.2. Makrokompozity

Obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru 10^0 až 10^2 mm. Tento typ kompozitu se hojně využívá ve stavebním průmyslu např. v podobě železobetonu (tj. beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty). Za makrokompozit můžeme považovat i plátované kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce (např. vozovky a chodníky) [2].

1.3. Nanokompozity

Jsou kompozitní materiály, které mají rozměr výztuže (délka částice, nebo průměr vlákna) v jednotkách nm [2].

2. Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se dají dělit hned dle několika různých hledisek. V této práci si je rozdělíme do dvou základních skupin podle tohoto materiálového složení:

- Podle tvaru matrice
- Podle tvaru zpevňující fáze

2.1. Rozdělení dle typu matrice

Podle typu matrice můžeme kompozity rozdělit na kompozity s polymerní, kovovou, keramickou, případně uhlíkovou a skleněnou maticí.

2.1.1. Matrice

Matrice je spojitá složka, která má za úkol spojovat zpevňující fáze a chránit ji před působením vnějších sil. Matrice se při zatížení musí lehce deformovat, spojovat a oddělovat jednotlivé části zpevňující fáze. Tyto vlastnosti zamezují vzniku a spojitému šíření trhliny. Druh použité matrice se odvíjí od požadovaných fyzických, chemických a mechanických vlastností. Nejčastěji používané matrice jsou polymerní, kovové, keramické, uhlíkové a skleněné [3].

2.1.2. Polymerní matrice

Tento druh matrice bývá nejčastěji používáný. Matici tvoří termoplast, reaktoplast, nebo síťovaný elastomer. Výztuž bývá vláknová, protože s částicovou výztuží se tato matrice vyrábí obtížněji. Vlákná bývají například aramidová, uhlíková nebo skelná. Výsledný kompozit má dobrou korozivzdornost a pevnost i za zvýšených teplot [3].

2.1.3. Kovová matrice

Matrice je tvořena lehkými kovy, nejčastěji hliníkovými a hořčíkovými slitinami. Ve srovnání s polymerní maticí má kovová lepší teplotní a elektrickou vodivost. Na druhou stranu má horší pevnost za normálních teplot a výrazně vyšší náklady na výrobu [4].

2.1.4. Keramická matrice

Tato matrice je tvořena karbidy, oxidy a nitridy křemíku. Jako nejvhodnější zpevňující fáze se zde využívají uhlíková a keramická vlákna. Tyto matrice jsou velmi pevné i při vysokých teplotách [3].

2.1.5. Uhlíkové a skleněné matrice

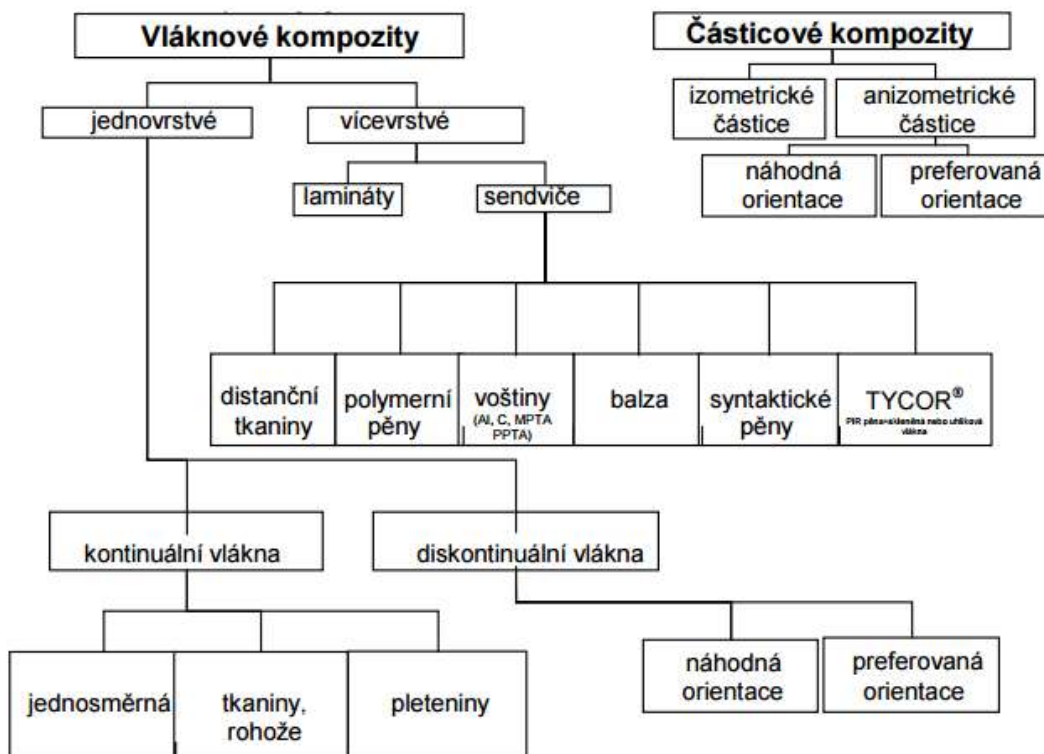
Uhlíkové a skleněné matrice mají podobné vlastnosti jako keramické matrice. Vyznačují se malou hustotou a dobrou odolností proti oxidaci [3].

2.2. Rozdělení dle tvaru zpevňující fáze

Podle tvaru zpevňující fáze můžeme kompozity rozdělit na kompozity vyztužené částicemi, nebo vlákny.

2.2.1. Zpevňující fáze

Zpevňující fáze neboli výztuž je nespojitá složka, která má za úkol v kompozitním materiálu zajistit mechanické vlastnosti. Zejména se jedná o pevnost a tuhost, ale třeba i elektrické vlastnosti. Z toho plyne, že výztuž má velký vliv na vlastnosti celého kompozitu. Výztuže se dle tvaru rozdělují na částicové a vláknové. Příklady rozdělení jsou uvedeny níže na obr. 1. [5].



Obr. 1 Rozdělení kompozitních materiálů dle geometrie a orientace výztuže [1].

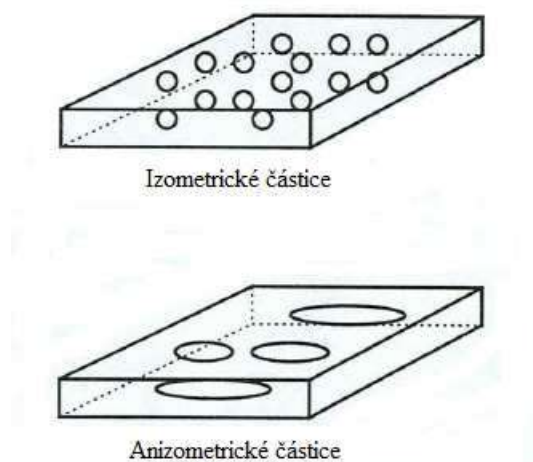
2.2.2. Částicové výztuže

Částicové kompozity jsou zpevněny jemnými částicemi ve tvaru jehliček, kuliček nebo destiček. Mohou být orientovány náhodně, nebo přednostně. Slouží ke zlepšení mechanických vlastností, ale i dalších vlastností jako např. tepelné odolnosti. Pro částicovou výztuž můžeme použít v podstatě libovolný materiál, nejčastěji se však využívá kovů a keramických materiálů. U kovů to bývá např. wolfram, titan, chrom, nikl atd. U keramických materiálů se zase nejčastěji používá karbid křemíku, karbid titanu, karbid wolframu a korund [4]. Mechanické vlastnosti částicových výztuží jsou znázorněny v tab. 1.

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti jednotlivých částic [4].

Částice	Hustota (g/cm^3)	Pevnost v tlaku (MPa)	Yongův modul (GPa)
Al_2O_3	3,9	2500	390
SiO_2	2,5	1100	70
Si_3N_4	3,2	3000	280
SiC	3,0	500	240
ZrO_2	6	2500	200

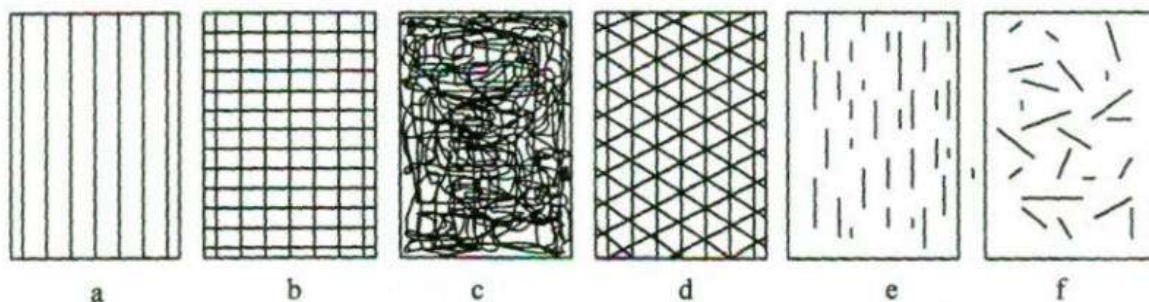
Částice mohou izometrické a anizometrické (Obr. 2). Izometrické jsou obvykle ve tvaru kuliček, které mají stejné rozměry. Anizometrické částice jsou ve tvaru jehliček s různými rozměry [6].



Obr. 2 Izometrické a anizometrické částice [6].

2.2.3. Vlákenné výztuže

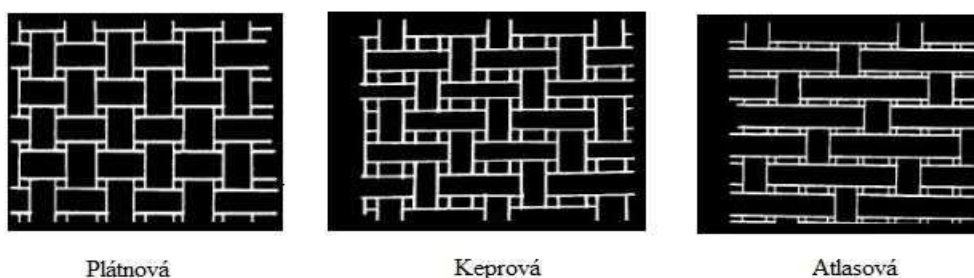
Pro výztuž kompozitu máme k dispozici mnoho druhů vláken. Vlákna v kompozitu mají velký vliv na tvarovou, tahovou a ohybovou pevnost. Směr uložení vláken v kompozitu má vliv na tuhost a pevnost. Orientace vláken v kompozitu může být jednosměrná, dvousměrná, víceosá nebo nahodile uspořádaná. Ve směru vláken je pevnost nejvyšší, ve směru mimo orientaci vláken je pevnost nižší. Vlákenné výztuže se dělí dle své délky na dlouhovláknou a krátkovláknou (Obr. 3) [5].



Obr. 3 Uspořádání vláknové výztuže a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [7].

Samotné vyztužující vlákna jsou jen málo používány. Ze zpracovatelských důvodů se používají upravené produkty. Těmi jsou příze, rohože, rovingy, tkaniny, krátká vlákna, prepregy [8].

Nejdůležitější jsou tkaniny, které tvoří tři základní vazby (Obr. 4). První plátňová vazba je ze všech nejpevnější, ale nejhůře se vyrábí, protože je nejméně tvárná. Keprová vazba je více poddajná, než plátňová vazba. Vyrábí se tedy lépe, je však méně pevná. Atlasová vazba je nejméně pevná, ale nejlépe tvárná [9].



Obr. 4 Základní typy vazeb tkaniny [9].

3. Vláknové kompozity

3.1. Skleněná vlákna

Nejčastěji používaná vlákna se vyrábí ze skloviny typu E, skloviny C a skloviny S. Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou výborným elektrickým izolantem, mají vysokou propustnost pro záření, proto se označují jako E – vlákna (elektrická) a jejich sklovina jako E – sklovina. Jedná se o vůbec nejčastěji používaný typ skloviny pro výrobu vláken. Vlákná ze skloviny C mají vysokou odolnost vůči kyselinám a dalším chemicky agresivním látkám. Vlákná ze skloviny S se vyznačují vyšším podílem oxidu křemíku, oxidu hořčíku a oxidu hliníku. Dále má tato sklovina vyšší teplotu tavení, proto je dražší [8].

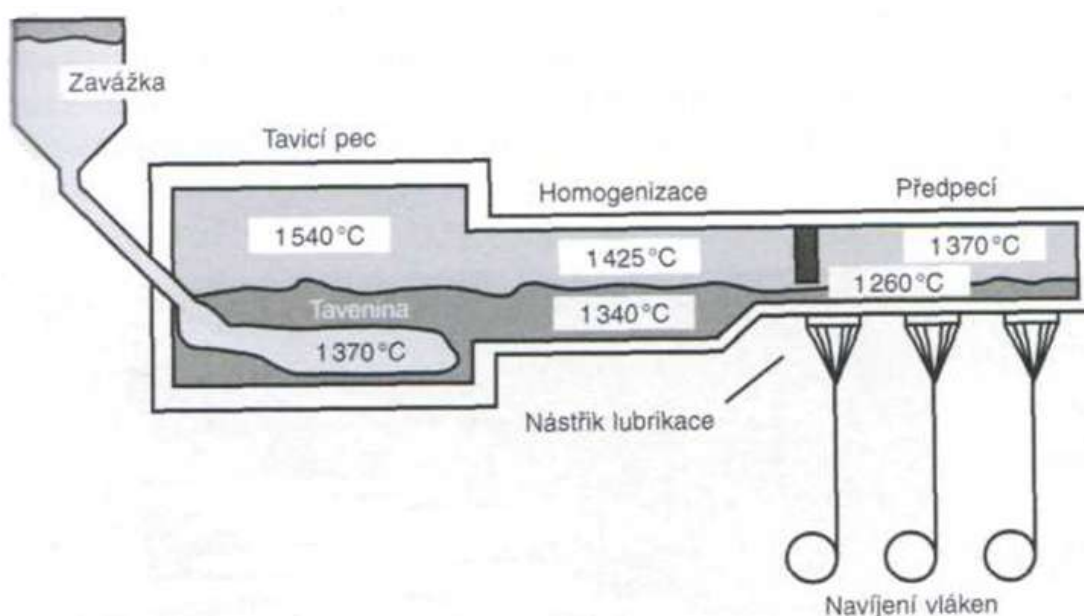
3.1.1. Vlastnosti skleněných vláken

Vlastnosti skleněných vláken si můžeme shrnout následovnými body:

- Materiálové vlastnosti jsou jak v příčném, tak v podélném směru stejné. Jedná se tedy o izotropní materiál.
- Dlouhodobé tepelné namáhání při 250 °C nesnižuje mechanické vlastnosti vláken, tepelná vodivost je vyšší než u ostatních materiálů, ale výrazně nižší v porovnání s kovy.
- Mají vynikající měrnou pevnost.
- Součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů.
- Skleněná vlákna jsou nehořlavá.
- Jsou nemagnetická.
- Chemicky odolná.
- Odolná proti změnám počasí.
- Při vyšším podílu vláken se vyznačují nízkou absorpcí vody.
- Mají nízké pořizovací náklady.
- Minimální náklady spojené s údržbou.

3.1.2. Výroba skleněných vláken

Výroba těchto vláken probíhá tažením z trysek. Zavážka skleněných kuliček se vsype do tavicí pece a při teplotě pohybující se okolo 1400 °C dojde k roztavení na E – sklovinu. Po roztavení se tato sklovina pár dní čirí. Sklovina potom vede do spřádacích trysek, které zajišťují, aby sklovina pomalu vytékala a tvrdla do tvaru vláken. Vlákná bývají na výstupu přibližně 2mm tlustá. Pomocí navíjecího zařízení se vlákna kalibrují na požadovaný průměr, tedy na 10-14 µm. Po dobu tažení se na vlákna nanáší vrstva lubrikace, která má za úkol chránit citlivý povrch vláken. Schéma postupu výroby skleněných vláken můžete vidět na obr. 5 [3] [8].



Obr. 5 Schéma výroby skleněných vláken pomocí tažení [3].

3.2. Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Výhodou tohoto druhu vláken je jejich vysoká pevnost a tuhost. V laminátu lze využít až 70 % jejich skutečné pevnosti a pokud použijeme matrici, která má vysokou tažnost, tak můžeme využít ještě více skutečné pevnosti. Nejčastěji se tato vlákna používají jako náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, výztuž pro pneumatiky, balistické aplikace a světlovodné kabely [8].

Většinou rozeznáváme dvě skupiny těchto vláken:

- Meta-aramidy (metafenylen-izoftalamidy, zkráceně také MPIA), vynikající svou termickou odolností a elektroizolačními schopnostmi.
- Para-aramidy (p-fenylen-tereftalamidy, zkráceně PPTA) s podstatně vyšší pevností v tahu a vyšším modulem pružnosti.

3.2.1. Vlastnosti aramidových vláken

Vlastnosti aramidových vláken si můžeme shrnout následovnými body:

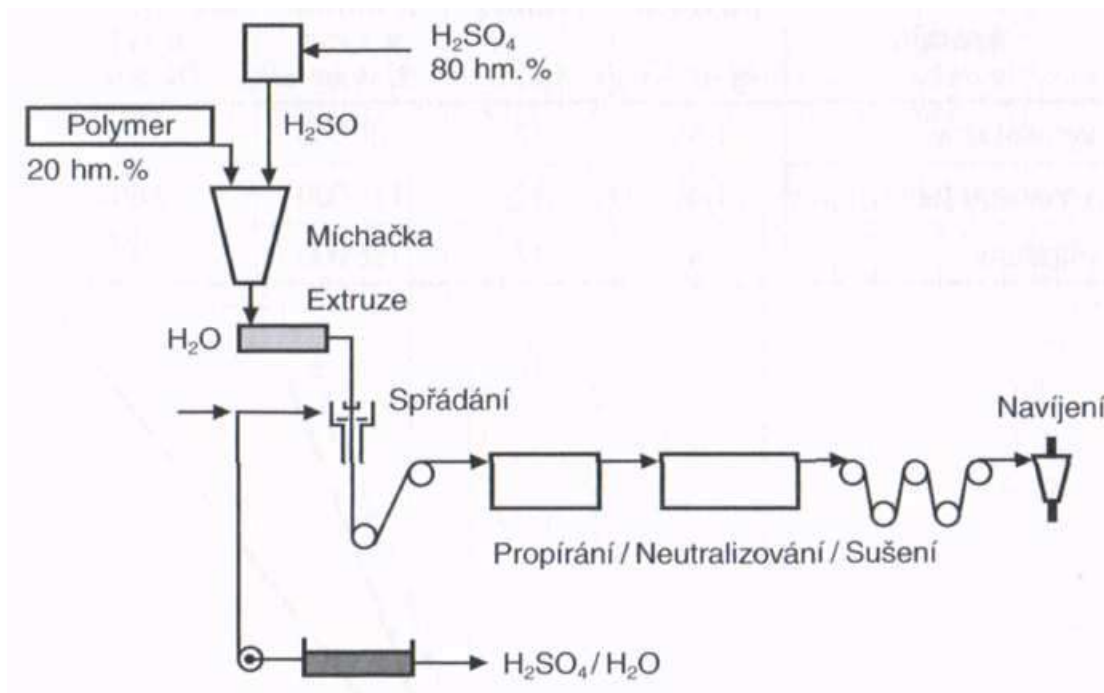
- Jedná se o nejlehčí vyztužující druh vlákna.
- Silně anizotropní.
- Ve směru vláken je mez pevnosti v tlaku výrazně nižší než mez pevnosti v tahu.
- Jsou hydrofilní, absorbují vlhkost až do 7 %, proto musí být vlákna před použitím vysušena (20 minut při 120 °C).
- Při expozici zářením s vysokou energií (např. UV záření) dochází k výraznému poklesu pevnosti vláken.
- Aramidy mají často nižší adhezi vláken k matrici ve srovnání s ostatními vlákny
- Vytvrzené konstrukční prvky z aramidových kompozitů mají špatnou obrobitelnost [8].

Tabulka 2 Vlastnosti jednosměrně vyztuženého epoxidového laminátu vyztuženého vysokomodulovým aramidovým vláknem [8]

Vlastnosti	Ve směru vláken ()		Kolmo na vlákno (⊥)	
	Tah	Tlak	Tah	Tlak
E-modul ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	80 000	80 000	6 500	5 100
Pevnost ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	1 800	230	8	53
Tažnost (%)	2,2	0,5	0,16	1,4
Příčné smrštění	0,3	0,3	0,025	0,02
Součinitel teplotní roztažnosti (K^{-1})	$-2 \cdot 10^{-6}$		$70 \cdot 10^{-6}$	
Vodivost ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\sim 2 \cdot 10^{-13}$		-	

3.2.2. Výroba aramidových vláken

Tento typ vláken se vyrábí pomocí spřádání vysokoviskozního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Lepší zpracovatelnosti vláken dosáhneme tak, že se jednotlivá vlákna spojují, propírají a následně neutralizují, jak je popsáno na obr. 6 [8].



Obr. 6 Schéma výroby aramidových vláken [8].

3.3. Uhlíková vlákna

Za uhlíková vlákna jsou považována ta, která vzniknou za teplot v rozmezí 800-1600 °C. Obsah uhlíku se musí pohybovat do 92 hm. %. Vlákna s vyšším obsahem uhlíku vyráběná navíc při vyšších teplotách se označují jako grafitová. Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou pevností a tuhostí, mají však nižší tažnost [10].

3.3.1. Vlastnosti uhlíkových vláken

Vlastnosti uhlíkových vláken si můžeme shrnout následovnými body:

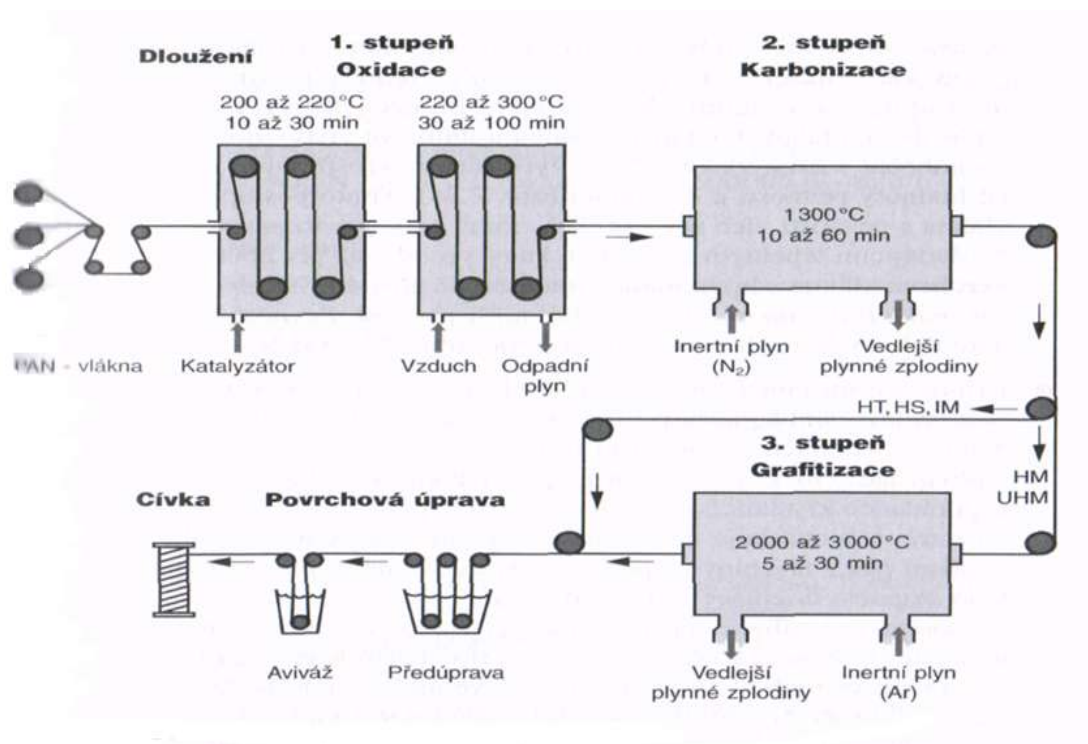
- Při zvyšujícím se zatížení roste hodnota E-modulu vláken.
- Mají nízkou hustotu $\rho=1,6$ až $2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- Jsou silně anizotropní.
- Za normálních podmínek jsou křehká a při zpracování se mohou snadno lomit.
- Mimořádně odolné vůči korozi.
- Při dlouhodobém skladování ztrácí ohebnost.

- Vysoká odolnost vůči dlouhodobému dynamickému namáhání.
- Jsou snášenlivé s tělesnými tkáněmi.
- Mají dobrý průchod záření, radarový paprsek však neodráží.

3.3.2. Výroba uhlíkových vláken

Mezi tři základní suroviny pro výrobu uhlíkových vláken patří celulóza, polyakrylonitril (PAN) a smola. Vláknina vyrobená z polyakrylonitrilu (PAN) jsou nečastěji používána. Vláknina z celulózy nemají úplně dokonalou strukturu a bývají využívány jako izolační materiál. Ze smoly se vyrábějí vlákna, které mají vysoký E-modul a navíc výborné tepelné a elektrické vlastnosti. Jediná výraznější nevýhoda je, že pevnost v tahu je podstatně nižší ve srovnání s ostatními vlákny. Tato vlákna jsou navíc technologicky nákladná a používají se pouze pro speciální účely [8].

Nejpoužívanější způsob výroby je výroba uhlíkových PAN-vláken. Tato výroba se rozděluje do tří stupňů. V prvním stupni dochází k dloužení polyakrylonitrilu z důvodů dosažení co největší orientace molekul ve směru osy vlákna. Pak dochází ke stabilizaci těchto vláken pomocí zahřívání na teplotu 200 až 300°C pod mechanickým napětím za přístupu vzduchu. V prvním stupni se PAN dehydruje a přemění se na žebříčkový polymer. Ve druhém stupni se přemění žebříčkový polymer na grafitickou strukturu pomocí karbonizace, která probíhá při teplotách okolo 1600°C. Takto jsou vyrobena vlákna o vysoké pevnosti, která může být vyšší než $5\,000\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Ve třetím a posledním stupni proběhne ohřev vláken na 2000-3000°C. Tím dosáhneme vyššího E-modulu vláken, který může být až $400\,000\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, ale pevnost vláken klesá. Po dokončení tohoto procesu získáme standardní uhlíková vlákna, které mají pevnost až $3\,500\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a E-modul $230\,000\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Schéma výroby těchto vláken můžete vidět na obr. 7, který je na další stránce [8].



Obr. 7 Schéma výroby uhlíkových PAN-vláken [8].

4. Technologie výroby kompozitních materiálů

K dispozici je mnoho způsobů pro výrobu laminátů, které se od sebe liší podle způsobu zpracování. Mezi nejvíce využívané technologie pro výrobu laminátů patří např. ruční kladení, lisování a tažení [8].

4.1. Ruční kladení

Ruční kladení (obr. 8) patří mezi nejstarší a zároveň nejjednodušší technologie pro výrobu laminátů. Jako první se nanáší na otevřenou formu vrstva separátoru a na ní následně vrstva gelcoatu, což je vrstva pryskyřice o tloušťce 0,3 až 0,6 mm, která slouží k ochraně povrchu výrobku před okolním prostředím. Do vzniklé vrstvy se následně klade vláknová výztuž, která se ještě prosycuje pryskyřicí pomocí nanášecího válečku. Vytvrzování probíhá většinou za pokojových teplot, pro urychlení se dotvrzují o teplotách 60 až 80 °C. Tato technologie je vhodná jak pro menší, tak rozměrné díly. Používané nářadí a pomůcky jsou jednoduché a navíc levné [8] [11].



Obr. 8 Schéma ručního kladení [11].

4.2. Lisování

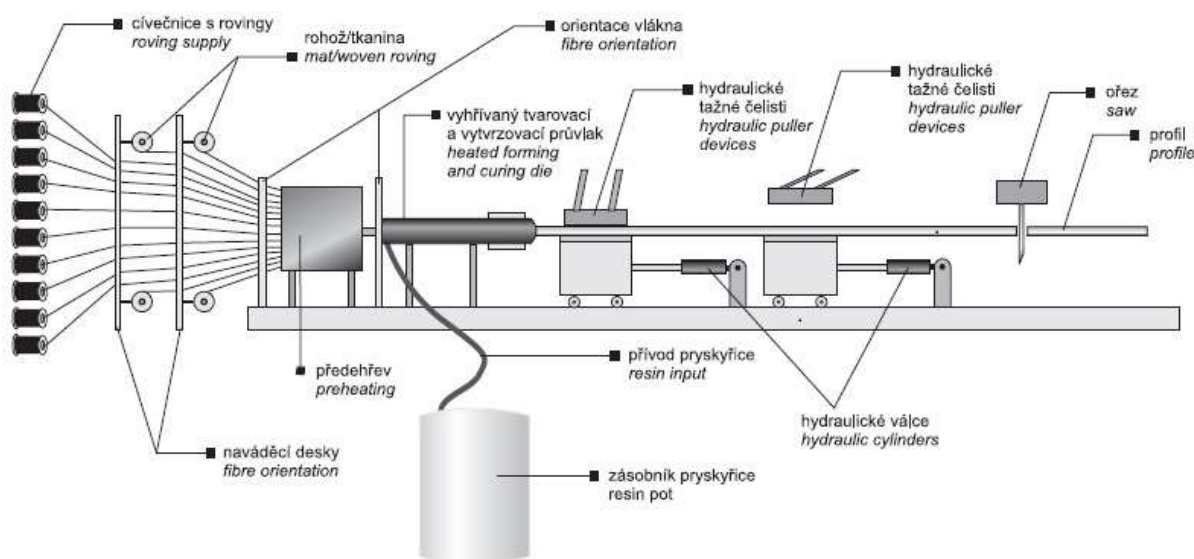
Tato technologie má více podob a dělí se na lisování za použití tepla a tlaku, na lisování za studena, pomocí vakua a v autoklávu. Lisování za tepla a tlaku se provádí ve dvou, nebo vícedílných kovových formách, které musí mít leštěné pracovní plochy. Formy se vyhřívají nejčastěji elektricky a jsou upevněny v hydraulických lisech schopných vyvodit tlaky 10-300 kg/cm². Výchozím materiálem mohou být např. prepregy. Lisování za studena se provádí za nízkého tlaku a normální teploty ve formách. Používají se dvoudílné formy, takže výlisek má oboustranně hladký povrch. Lisování pomocí vakua se používá pro zvýšení

obsahu výztuže, navíc můžeme díky vakuu odsát přebytečnou pryskyřici pro navýšení mechanických vlastností. Pro sériovou výrobu velkorozměrných konstrukcí se používá lisování v autoklávu. Jedná se o nejnákladnější a nejsložitější technologii. Výchozím materiálem jsou vždy prepregy, které vyžadují vytvrzování za zvýšených teplot. [11].

4.3. Tažení

Touto metodou lze efektivně vyrábět různé plné, duté i tvarové profily s vysokým obsahem výztuže (až do 80%). Výztuž (nejčastěji skleněná) prochází lázní s iniciovanou pryskyřicí a po prosycení a odždímání přebytečné pryskyřice je vtažována do tvarovacích a vytvrzovacích průvlaků (forem), jejichž dutina odpovídá vnějšímu tvaru vyráběných profilů. Tato technologie nemá oproti ostatním technologiím vysoké prvotní náklady. Pomocí tažení jsme schopni vyrábět profily od velmi tenkých a jednoduchých (1mm pásky pro vyztužení hokejek a lyží) až po velmi složité a rozměrné (šíře a výška několik desítek cm, tloušťka stěny až 15mm). Schéma této technologie je na obr. 9 [11].

Schéma tažení/ *pultrusion-process lay-out*



Obr. 9 Schéma tažení [11].

5. Použití kompozitních materiálů

Hlavní důvod pro stále častější nahrazování běžně používaných materiálů těmi kompozitními je velká redukce hmotnosti dané součásti, která může dosahovat 20 až 30 %. S redukcí hmotnosti u konečných výrobků také souvisí výrazná úspora materiálu. Kompozitní materiály jsou však drahé a proto stojí za úvahu, zda je jejich využití opravdu výhodné a nezbytné. Největší pokrok při rozvoji kompozitních materiálů nastal v leteckém a kosmickém průmyslu. Další odvětví, ve kterých se kompozity často používají, jsou např. lodní a automobilový průmysl [1].

5.1. Použití v letectví

V leteckém průmyslu se nejčastěji používají především kompozity s polymerní matricí a uhlíkovými vlákny. Tyto materiály mají výztuž z uhlíkových vláken a matrici na bázi epoxidových pryskyřic [12]. Příklady konkrétních aplikací můžete vidět na obr. 10,11,12.



Obr. 10 Bombardér B-2 Spirit [1].



Obr. 11 Stíhací letoun F-22 [1].



Obr. 12 Komerční tiché supersonické letadlo NASA [1].

5.2. Použití v lodním průmyslu

Prvotně byl pro stavbu lodí nejčastěji využívaným materiálem dřevo. Postupem času se přecházelo na ocel a nyní máme lodě, které mají kompozitní díly, nebo jsou i celokompozitové. Nejčastěji se využívá laminát se skelnými vlákny [1]. Příklady konkrétních aplikací můžete vidět na obr. 13,14,15.



Obr. 13 Hlídkový trimaran Ocean Eagle 43 pro US Navy [1].



Obr. 14 "Stealth" lod "M 80 Stiletto" [1].



Obr. 15 Bezposádkový člun Piranha [1].

5.3. Použití v automobilovém průmyslu

Ve srovnání s ostatními průmysly se v tom automobilovém využívá kompozitních materiálů nejenom pro redukci hmotnosti a případně zlepšení mechanických vlastností, ale i s estetických důvodů. K tomu se používá hlavně laminátů s uhlíkovými vlákny. Častá je také kombinace aramidových, nebo uhlíkových vláken s epoxidovou pryskyřicí. Nevýhodou tohoto kompozitu je však jeho cena. Automobilový průmysl je považován za největšího spotřebitele kompozitních materiálů. Příklady konkrétních aplikací můžete vidět na obr. 16,17,18 na následující stránce.



Obr. 16 StudentCar SCX [13].



Obr. 17 Tesla model X [1].



Obr. 18 Auto od Morgan Advanced Materials pro indickou armádu [1].

6. Metody měření mechanických vlastností laminátů

Kompozitní materiály ve srovnání s běžnými typy materiálů vykazují větší rozptyl vlastností, proto je pro jejich hodnocení vlastností nezbytná statistická analýza. Pro jednotné zkušební podmínky (teplota, vlhkost) se provádí alespoň 5 zkoušek. Měří se pevnost v tahu (σ_{pt1}) a tlaku (σ_{pd1}) ve směru vláken, pevnost v tahu (σ_{pt2}) a tlaku (σ_{pd2}) kolmo k vláknům a pevnost ve smyku τ_{p12} [1].

Pevnost kompozitu je funkcí pravděpodobnosti výskytu nebezpečného defektu (tzv. velikostní faktor). Malé vzorky mají vyšší střední pevnost než vzorky velké. Pro požadovanou přesnost Δ je počet měření dán rovnicí:

$$n = u_p^2 \frac{\sigma^2}{\Delta^2} \quad \text{Rov. (1)}$$

Kde u_p je pravděpodobnostní koeficient a σ je směrodatná odchylka hlavního souboru. Nyní musíme použít odhad směrodatné odchylky σ_0 základního souboru, protože odchylku hlavního souboru σ neznáme

$$\sigma_0^2 = s^2 \frac{n}{n-1} \quad \text{Rov. (2)}$$

Kde „n“ je počet měření při jejím stanovení a „s“ výběrová směrodatná odchylka. Pro spolehlivost 95% je koeficient $u_p=1,96$ (5 % výsledků je mimo pole intervalu spolehlivosti), pro spolehlivost 99% je $u_p=2,58$. Potřebný počet vzorků je potom dán následující rovnicí:

$$n \geq u_p^2 \frac{\sigma_0^2}{\Delta^2} \quad \text{Rov. (3)}$$

Vlastnosti daného kompozitu nestačí vyjádřit jen průměrem a výběrovou směrodatnou odchylkou naměřených dat. Určování meze spolehlivosti je normována podle ISO 2602. Nejčastěji je brána v potaz pravděpodobnost 95%. V tomto případě se tedy pouze 5% hodnot z celkového počtu odchyluje od střední hodnoty více, než udává mez spolehlivosti. Pravděpodobnost 99% se volí pouze pro kritické případy, což vyjadřuje pravděpodobnost, že jen jedno procento dat se odchyluje od střední hodnoty o hodnotu větší, než udává mez spolehlivosti [1].

Postup při určení hodnoty:

- Jako první se určí odhad střední hodnoty při Gaussově rozdělení

$$\bar{E} = \frac{\sum E_i}{n} \quad \text{Rov. (4)}$$

- Následně se vypočítá výběrová směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Rov. (5)}$$

- Nakonec se určí konfidenční interval (mez spolehlivosti). Pro vypočtenou výběrovou směrodatnou odchylku „s“ je naměřená hodnota X v rozmezí

$$x - t \frac{s}{\sqrt{n}} < x < x + t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Rov. (6)}$$

Výsledek, např. modul pružnosti E, se zapíše:

$$E = E \pm [\text{GPa}] \quad \text{Rov. (7)}$$

6.1. Použité normy pro mechanické testování kompozitních materiálů

Technické normy jsou dokumenty, které poskytují uživateli pravidla, návody nebo definice pro určité výrobky nebo postupy. Jsou určeny pro stálé, nebo opakované využití a vytvořené v kooperaci odborníků v konkrétním oboru. Každý technický požadavek na výrobek, nebo na pracovní postup a každá technická norma je upravována jednotlivými právními řády. V České republice tak vznikají normy ČSN a například ve Spojeném Království Velké Británie a Severního Irska vznikají normy, které se označují jako BS (British Standard). Tato bakalářská práce se však v rámci jednotlivých mechanických zkoušek kompozitních materiálů bude upínat k Americkým normám ASTM (American society for Testing and Materials). Tato mezinárodní standardizační organizace vyvíjí a dodává technické normy pro širokou škálu materiálů, výrobků, postupů, systémů a služeb [14].

6.1.1. Značení normy ASTM

ASTM norma vydaná Americkou společností pro testování a materiály (American Society for Testing and Materials), zal. 1898, sídlo: West Conshohocken, Pennsylvania

6.2. Vybrané americké normy ASTM

ASTM D3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
ASTM D695	Compressive Properties of Rigid Plastics
ASTM D790	Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
ASTM D6272	Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending
ASTM D7291	Standard Test Method for Through-Thickness “Flatwise” Tensile Strength and Elastic Modulus of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Material
ASTM D6415	Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite
ASTM D2344	Short Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates by Short-Beam Method
ASTM D3518	Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate
ASTM D4255	Guide for Testing In-Plane Shear Properties of Composite Laminates
ASTM D5379	Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method
ASTM D5766	Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates

6.3. Tahová zkouška (ASTM D3039/D3039 M-14)

Tato zkouška se používá k měření síly potřebné k přerušení kompozitního vzorku. Pomocí této zkoušky se dále zjišťuje, do jaké míry se tyto vzorky protáhnou do kritického bodu přerušení. Tahové zkoušky produkují deformační diagram, který se používá k určení modulu pružnosti v tahu. Data se často používají jako kontrola kvality materiálu a na základě těchto dat se určí materiál. Dále se navrhne díl tak, aby vydržel působení určité síly. Obvyklá šířka vzorku je 25mm, (dovolená je i menší šířka, např. 10mm), tloušťka 2 až 4 mm, celková délka 250 mm, pracovní délka 150 mm. U těles určených k měření kolmo k vláknům se používá pracovní délka pouze 95mm. Na koncích pásků bývají pomocí epoxidového lepidla přilepeny plechové příložky (Nejčastěji Al případně Al slitiny) o tloušťce cca 3 mm. Vzorek je sevřen v čelistech na univerzálním zkušebním trhacím stroji a následně je čelistmi tažen až do porušení. Tyto čelisti trhacího stroje bývají hydraulické, nebo pneumatické. Pro tuto zkoušku dle normy lze zkušební rychlost určit dle specifikací materiálu, nebo doby do porušení (1-10 min.). Typická rychlost zkoušky pro standardní zkušební vzorky je 2mm/min. Pro přesné určení podélné a příčné deformace (prodloužení a příčné zúžení) se využívá elektrický průtahoměr. Univerzální trhací stroj je na obr. 19 [1] [15] [30].



Obr. 19 Část trhacího stroje pro tahovou zkoušku dle ASTM D3039 [16].

Výsledky tahové zkoušky jsou:

- Modul pružnosti v tahu E_1 a E_2
- Poissonův součinitel ν_{12}
- Pevnost v tahu σ_{pt1} a σ_{pt2}
- Poměrné prodloužení při přetržení ε

6.4. Tlaková zkouška (ASTM D695-15)

Pokud začne působit tlak na jednosměrně vyztuženou vrstvu ve směru os vláken, tak dojde k porušení vlivem ztráty stability vláken (vzpěr). Míra pevnosti hodně závisí na zvlnění vláken a také na úroveň mezifázové soudržnosti. Pokud máme úroveň této soudržnosti dobrou, tak ke ztrátě stability dojde koordinovaným vybočením vláken, díky smykové deformaci matrice. Naopak pokud je mezifázová soudržnost matrice a vláken malá, tak dojde k rozvrstvení zkušebního vzorku a je tím dosažena nízká pevnost v tlaku. Kompozity, které mají vysoce tuhá vlákna o velkých průměrech (např. vlákna bóru, nebo SiC) vykazují nejvyšší pevnost v tlaku. Zkušební vzorky pro tuto zkoušku mohou mít opět tvar pásku, který má však kratší pracovní část. Pokud chceme použít těleso s příložkami, tak mezi nimi musíme ponechat pracovní část o délce 10mm. Můžeme také použít zkušební vzorek ve tvaru hranolku bez příložek. Vzorek však v tomto případě musí být během zkoušky veden, aby nedošlo k namáhání ve vzpěru.

Typický hranolek dle normy je široký a vysoký 12,7 mm a má délku 25,4 mm. Zatěžování u tohoto typu zkoušky je relativně nízké a provádí se rovnoměrnou rychlostí. Vzorek se vloží mezi tlakové desky rovnoběžně s povrchem. Maximální zatížení se zaznamená spolu s deformačními údaji. Tato zkouška je použitelná u složeného modulu až do 41,370 MPa. Typická rychlost zatěžování je od 1,3 do 3 mm/min. Extenzometr, který je připevněn k přední části držáku slouží k určení modulu pružnosti v tlaku. Na obr. 20 na další stránce si můžeme prohlédnout typický přípravek pro tuto zkoušku [1] [15] [31].



Obr. 20 Přípravek pro tlakovou zkoušku dle ASTM D695-15 [17].

Výsledky tlakové zkoušky jsou:

- Modul pružnosti v tlaku E_d
- Poissonův součinitel v tlaku ν_d
- Pevnost v tlaku σ_{pd1} a σ_{pd2}
- Poměrné zkrácení při porušení ε_d

6.5. Tříbodová ohybová zkouška (ASTM D790-15)

Během této zkoušky se pevnost laminátu během ohybu silně odvíjí od jeho vrstvení. Proto u laminátů, které mají jednoznačný směr tahového namáhání (např. nosníky, listová pera) musí mít krajní vrstvy vlákna orientovaná ve směru tahového namáhání. Během ohybového namáhání vykazují nejvyšší únosnost tzv. sendvičové konstrukce. Tyto konstrukce jsou charakteristické tím, že je mezi dvě laminátové desky vkládána distanční vložka, kterou tvoří např. balza, voštiny, pěnová hmota a další. Musíme mít na paměti, že naměřený modul

pružnosti v ohybu u této zkoušky není roven modulu pružnosti naměřeným během tahového namáhání. Tato zkouška měří sílu potřebnou k ohýbání zkoušeného vzorku, který je umístěn mezi tři podpěry. Modul pružnosti v ohybu se používá jako označení tuhosti materiálu v momentě, kdy došlo k ohybu. Zkušební vzorek je umístěn mezi dvě podpěry a zatížení je aplikováno do centra pomocí zatěžovacího trnu, díky němuž dojde k tříbodovému ohybu ve stanoveném poměru. Test se zastaví v momentě, kdy zkušební vzorek dosáhne 5% průhybu, nebo se zastaví před dosažením této hodnoty. Nejčastěji využívaný vzorek dle normy má 3,2 mm na výšku, 12,7 mm na šířku a je 125 mm dlouhý. Jako podpory slouží válečky o průměru 12,7 mm a délce 63,5 mm. Poměr vzdálenosti podpor k tloušťce tělesa musí být alespoň 16:1, aby bylo smykové zatížení malé. Normy ASTM dále doporučují poměry 16:1, 32:1, 40:1 a 60:1. Rychlost zatěžování se volí dle druhu materiálu. Existují dvě možnosti. Pro materiál, který podléhá menším výchylkám v průběhu zatěžování je rychlost 0,01 mm/min. Pro materiál, který podléhá velkým výchylkám v průběhu zatěžování je rychlost zatěžování 0,10 mm/min. Přípravek pro tříbodovou ohybovou zkoušku dle ASTM je na obr. 21 [1] [18] [32].



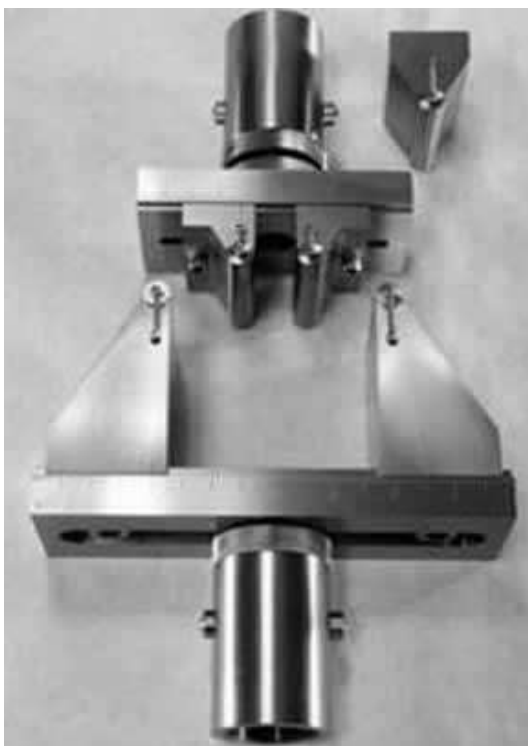
Obr. 21 Přípravek pro tříbodovou ohybovou zkoušku dle ASTM D790-15 [17].

Výsledky ohybové zkoušky jsou:

- Modul pružnosti v ohybu E_o
- Pevnost v ohybu σ_{po}

6.6. Čtyřbodová ohybová zkouška (ASTM D6272-10)

Pomocí tohoto testu se měří síla potřebná k ohnutí zkušební vzorku, který je umístěn pod nakládací systém čtyř bodů. Hlavní rozdíl mezi třibodovým a čtyřbodovým ohybem je umístění ohybového momentu. Čtyřbodový ohyb umožňuje rovnoměrné rozložení mezi oba zatěžovací trny, zatímco centrum zatěžování u třibodového ohybu je umístěno přímo pod zatěžovací trn. V rámci tohoto testu existují dva možné postupy. Postup A je určen pro materiály, které podléhají menším výchylkám v průběhu zatěžování. Tento postup se používá pro zjištění ohybových vlastností, zejména modulu ohybu. Postup B je vhodný pro materiály, které podléhají velkým výchylkám v průběhu zatěžování, a je vhodný pro měření pevnosti v ohybu. Rychlost zatěžování je pro postup A roven 0,01 mm/min. a pro postup B je 0,10 mm/min. Přípravek dle ASTM D6272 je na obr. 22 [1] [15] [33].

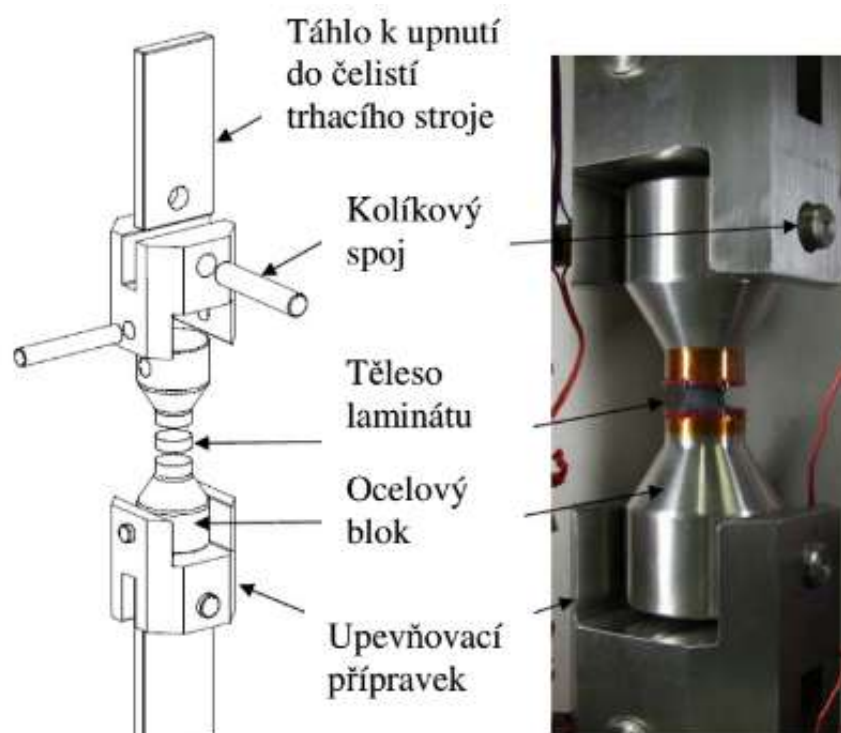


Obr. 22 Přípravek pro čtyřbodový ohyb dle ASTM D6272 [17].

6.7. Tahová zkouška (ASTM D7291/ D7291 M-15)

Tato zkušební norma je určena k měření napětí průchozí tloušťky naplocho a modulu pružnosti v tahu. Kompozitní vzorek má tvar buď válcovitého kotouče s rovnými stěnami, nebo sníženého kalibru. Sestava je zatěžována tahovou silou působící kolmo k rovině vzorku

až do porušení. Tahová síla se převede na zkušební vzorek specifického tvaru pomocí přilepených tlustých přílohek, které jsou kovové, viz obr. 23 [1] [20] [34].



Obr. 23 Těleso laminátu upnuté pomocí táhla do trhacího stroje [1].

6.8. Ohybová zkouška (ASTM D6415-06)

Pevnost v tahu mezi jednotlivými vrstvami (tj. ve směru tloušťky laminátu) se může také měřit pomocí zakřiveného nosníku s úhlem 90° (poloměr ohnutí 6,4 mm), kdy tahová síla otevírá úhel 90° . Maximální ohybový moment nastává v okamžiku ohnutí a to má za následek lokální tahové namáhání ve směru tloušťky zkoušeného laminátu. Při tomto způsobu zatížení je však napjatost komplikována tahovou složkou napětí a z tohoto důvodu je výhodnější aplikovat čtyřbodový ohyb vzorku, kde působení osového tahového napětí chybí, viz obr. 24 na následující stránce. Standardní vzorek je 25,4 mm široký a tlustý od 2,54 do 12,7 mm. Tloušťka závisí na druhu laminátu, který je testován. Vzorek je podepřen a zároveň zatěžován na válcích o průměru 9,5 mm. Tyto válce jsou namontovány v kuličkových ložiscích. V horní i dolní části držáku je otvor se závitem pro připevnění k podkladu a příčníku zkušebního stroje. Délka rozpětí na dolní liště by měla být 100 mm a délka rozpětí na horní liště 75 mm. Průměrná hodnota tlaku na zkušební vzorek se u tohoto druhu zkoušky uvádí od 68,9 do 82,7 MPa. [1] [17] [35].

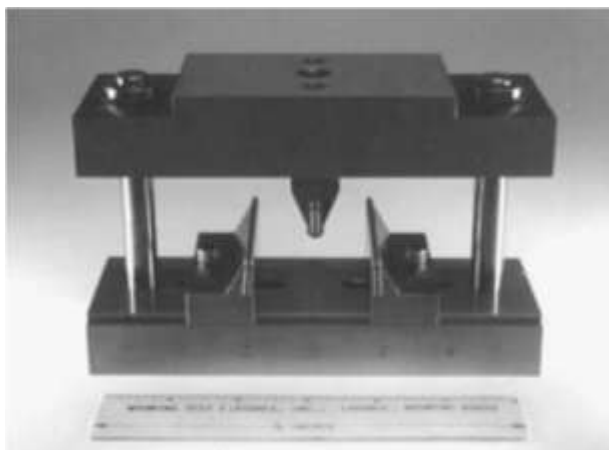


Obr. 24 Čtyřbodový ohyb [17].

6.9. Ohybová zkouška krátkého nosníku (ASTM D2344-16)

Tato zkouška se používá pro stanovení interlaminární pevnosti ve smyku vláken. Zkoušet lze všechny kompozitní materiály, které jsou vyztuženy paralelními vlákny. Jako vzorky slouží malé segmenty vyříznuté z kroužku, nebo krátké nosníky vyříznuté z plochého laminátu. U standardního testu mohou být silnější než 6,4 mm. Vzorek se umístí na horizontální plochu zkušebního zařízení tak, že vlákna jsou rovnoběžná se zatěžovacím trnem. Zatěžovací trn působí silou směrem dolů na střed vzorku až do lomu rychlostí 1,3 mm/min. Síla se potom zaznamená. Počet vzorků je volitelný, je jich však zapotřebí minimálně 10 pro získání uspokojivého průměru měření pro jeden laminát. Během třibodového ohybu krátkého nosníku, kde je poměr vzdálenosti podpor k tloušťce nosníku 4:1 nemůžeme zanedbávat smykovou sílu. Tato síla kumuluje do maximálních hodnot ve střední rovině nosníku a může způsobit smykové porušení vrstev zkoušeného laminátu. Pokud dojde při zkoušce k lomu,

nebo k deformaci vzorku, tak nelze určit smykovou pevnost. Jestliže se zkušební těleso poruší jiným způsobem než vodorovným smykem, tak je třeba zkoušku zopakovat. Přípravek pro tuto zkoušku je na obr. 25 [1] [15] [19] [36].



Obr. 25 Přípravek pro ohybovou zkoušku krátkého nosníku [17].

U této zkoušky můžeme aplikovat i čtyřbodový ohyb. Tento způsob namáhání se volí tehdy, když se zkoušený laminát během tříbodového ohybu neporuší smykem, ale spíše dochází k lámání v místě maximálního ohybového momentu.

6.10. Rovinná smyková zkouška (ASTM D3518/ D3518 M-94)

Vlastnosti laminátu během rovinného smyku lze určit při tahové zkoušce vzorku, který má tvar pásku se symetrickým vrstvením $[\pm 45]$, nebo s vrstvením $[\pm 20]$. Smykové napětí je dáno vztahem:

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} \sigma_{xx} \quad \text{Rov. (8)}$$

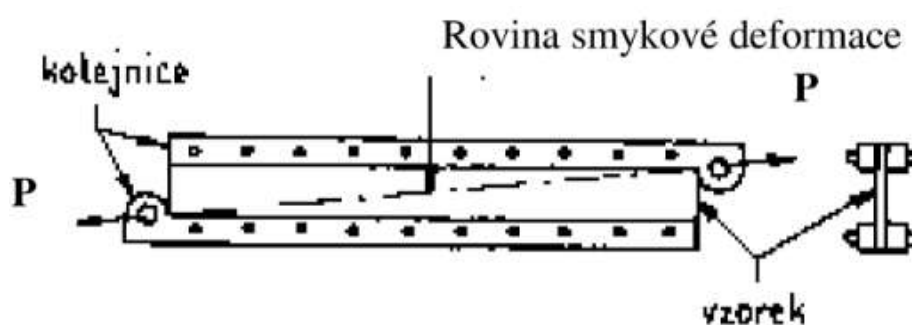
Testované vzorky jsou umístěny v sevření univerzálního testovacího stroje na určeném oddělení držadla a následně dochází k tažení vzorku až do porušení. Pokud jsou požadovány údaje, jako je stříhová deformace, nebo modul pružnosti ve stříhu spolu s maximálním smykovým napětím, vázané tenzometry jsou namontovány do vzorku pro měření deformací v průběhu zkoušky. Nejčastěji užívaný vzorek dle normy má konstantní obdélníkový průřez 25 mm široký a 250 mm dlouhý. Typická rychlost zatěžování je 2 mm/min. [1] [15] [37].

Výsledky rovinné smykové zkoušky jsou:

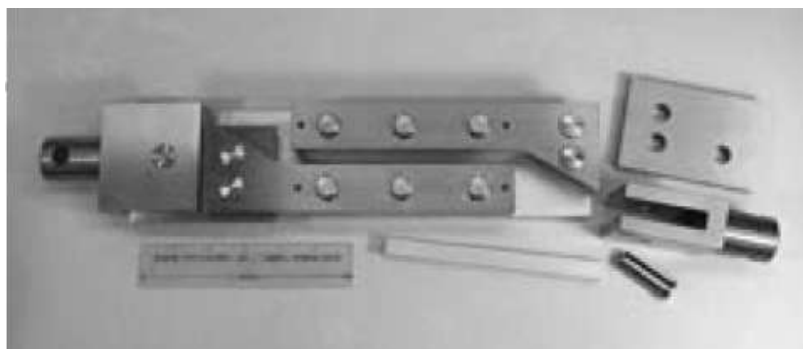
- Moduly pružnosti ve smyku G
- Pevnost ve smyku τ_p

6.11. Kolejnicové zkoušky (ASTM D4255)

Nejčistší smyková napjatost je dosažena při torzní zkoušce vinuté tenkostěnné trubky. Pokud máme těleso ve tvaru desky nebo pásku, tak použijeme zkoušky kolejnicové nebo tzv. Iosipescuův test. Při všech metodách lze zjistit jak modul pružnosti ve smyku G_{xy} , tak rovinnou smykovou pevnost τ_{pxy} . Smykové deformace se měří pomocí tenzometrické růžice. Tato metoda určuje střížné vlastnosti v rovině pro kompozitní materiály, které jsou vyztuženy vlákny s vysokým modulem. U této metody se vzorek laminátu vloží mezi dva páry zatěžovacích lišt. Při zatížení v tahu kolejnice přenesou stříhové síly na vzorek. Zkušební vzorek určený pro dvoukolejnicový test je 152,4 mm dlouhý a 76,2 mm široký. Dovolena je jakákoliv přiměřená tloušťka, norma však doporučuje volit tloušťku od 1,3 do 3,3 mm. Tři šrouby v každé kolejnici prochází vzorkem. Je tedy třeba, aby byl vzorek opatřen šesti volnými otvory. Tato zkušební metoda není moc v oblibě zejména proto, že je potřeba poměrně velký vzorek. Navíc jsou zde další náklady spojené s nutností vrtání šesti otvorů ve vzorku. Zatěžování je prováděno tahem (síla P) viz obr. 26, 27 [1] [17] [21] [38].

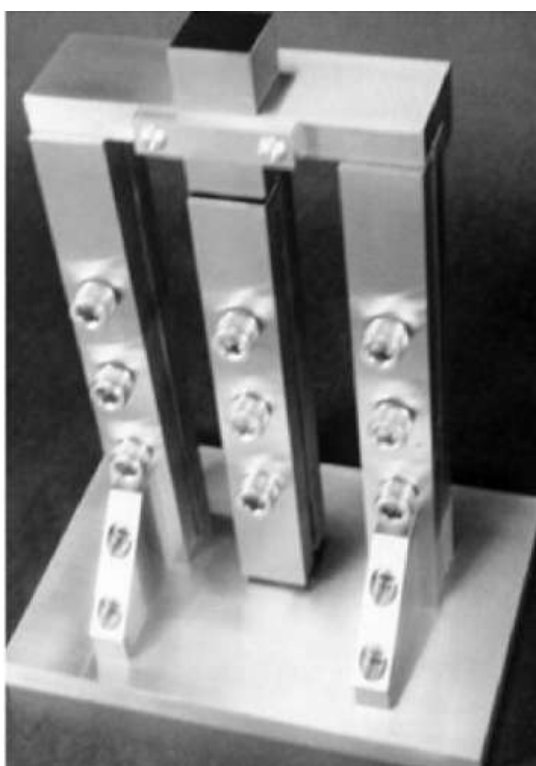


Obr. 26 Schéma zkušebního tělesa pro dvoukolejnicový test [1].



Obr. 27 Zkušební těleso pro dvoukolejnicový test [1].

Kromě zmíněného testu se provádí také tzv. tříkolejnicový test. Těleso je zde 152,4 mm dlouhé, 136,525 mm široké a tloušťka se volí dle požadavků. Přípravek pro upnutí do zkušebního stroje je uveden na obr. 28 [1].

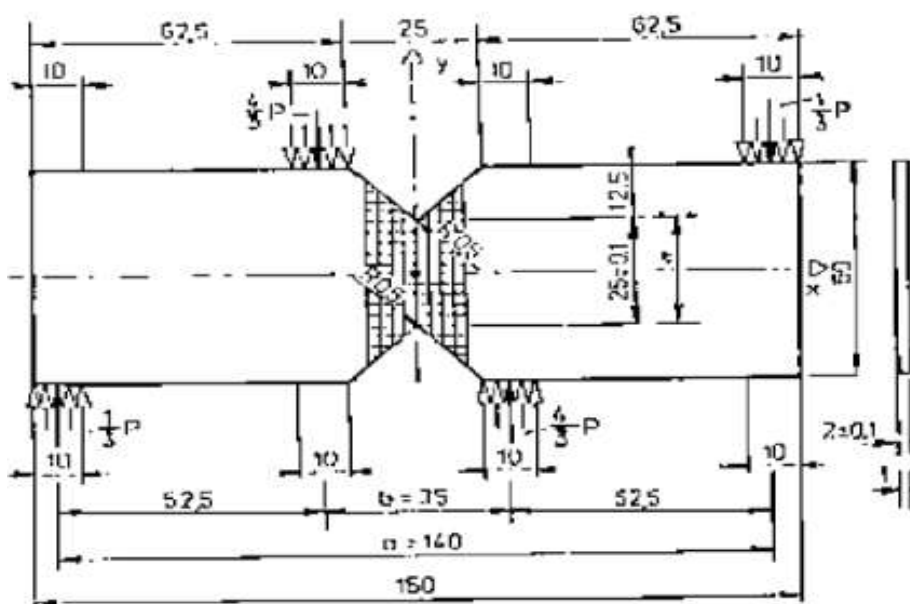


Obr. 28 Přípravek pro tzv. tříkolejnicový test [17].

6.12. Iosipescova zkouška (ASTM D5379-12)

Tento test se používá pro zjištění smykových vlastností kompozitních materiálů, které jsou vyztuženy vlákny s vysokým modulem. Test určuje smykové napětí a smykový modul.

Vzorek opatřený vrubem se umístí do přípravku. Tenzometry mohou být aplikovány na obě strany vzorku, aby bylo zajištěno, že proběhne stříh a nikoli krut. Selhání musí nastat smykem. Zatížení se aplikuje ve stanoveném poměru, dokud nedojde k selhání vzorku. Maximální zatížení dle standardu je 50 kN. Pro zatěžování tělesa se zde využívá speciální přípravek, který je upnut ve zkušebním stroji. V tomto přípravku je vzorek uložen tak, že osa oboustranného „V“ vrubu je rovnoběžná s osou zatížení. Standardní zkušební těleso pro Iosipescovu zkoušku a jeho zatížení je na obr. 29 [1] [15] [39].



Obr. 29 zkušební těleso pro Iosipescův test [1].

Přípravek pro Iosipescův test je na obr. 30 na další stránce.



Obr. 30 Přípravek pro Iosipescův test [17].

Smykové napětí je dáno vztahem:

$$\tau = \frac{P}{wt} \quad \text{Rov. (9)}$$

přičemž w je šířka tělesa a t je tloušťka tělesa.

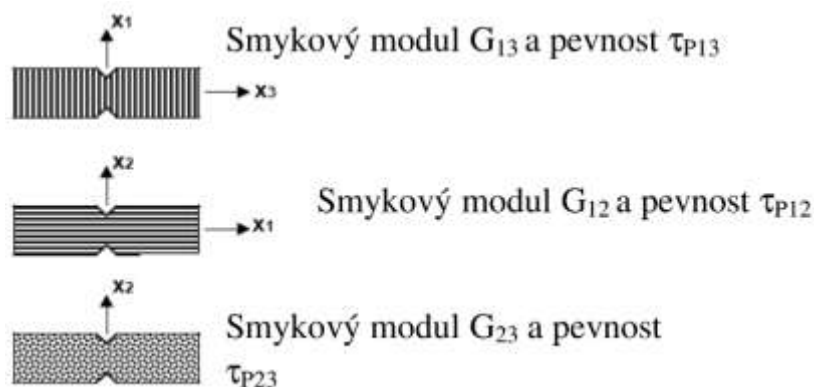
Modul pružnosti ve smyku pro kód skladby [0] je dán vztahem:

$$G_{12} = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma_{12}} = \frac{\Delta P}{wt\Delta(\epsilon_{+45} - \epsilon_{-45})} \quad \text{Rov. (10)}$$

Smyková deformace je dána vztahem:

$$\gamma = \Delta(\epsilon_{+45} - \epsilon_{-45}) \quad \text{Rov. (11)}$$

Podle typu uspořádání vláken dostáváme různé smykové moduly pevnosti a pružnosti ve smyku podle obr. 31 na další stránce [1].



Obr. 31 rozdělení modulů pružnosti a pevnosti dle uspořádání vláken [1].

6.13. Zkouška laminátu s otvorem (ASTM D5766)

Test dle této ASTM normy patří k těm novějším. Měří se síla potřebná k přerušení laminátu, který je opatřen centrálně orientovaným otvorem. Otvor umožňuje větší koncentraci napětí a snižuje čistý řez, zatímco zkušební metoda vypočítává maximální pevnosti na základě hrubé průřezové plochy, bez ohledu na otvor. Výhodou této zkušební metody je, že díky otvoru v laminátu může test sloužit jako simulace defektu v polymerní matici kompozitu. Toho se často využívá pro zkoušení vzorku materiálu, který se používá v leteckém průmyslu. Zkušební vzorek je umístěn do čelistí univerzálního testovacího stroje, kde je následně vystaven tahu až do porušení. Obvykle hydraulické čelisti testovacího stroje jsou opatřeny klínovými úchyty, aby se zabránilo sklouznutí. U tohoto testu existuje hned několik možností selhání, ale je důležité, že pouze poruchy v místě otvoru poslouží jako kvalitní zdroj dat pro vyhodnocení. Nejčastěji používaný vzorek pro tento test dle ASTM má 38 mm na šířku a je 254 mm dlouhý. Typická rychlost zkoušky pro standardní vzorky je 2mm/min. V závislosti na typu výztuže může být nezbytné testování ve více orientacích. Typický vzorek uchycený v hydraulických čelistích je na obr. 32 na další stránce [15] [40].



Obr. 32 Zkušební vzorek uchycený do hydraulických čelistí dle ASTM D5766 [15].

6.14. Návrh metodiky zkoušení

Pro návrh měření mechanických vlastností kompozitního dílu jsem si vybral automobil Lamborghini Aventador (obr. 33) z dílny americké společnosti Vitesse AuDessus, která se zabývá úpravou aut. V nabídce má tato společnost právě Lamborghini Aventador, které však má oproti původní verzi nejen karbonový monokok, ale má kompletně celou karoserii z ručně vyrobeného karbonu. Pro zkoušení jsem si vybral část dveří (obr. 34), které musí mít dobré mechanické vlastnosti s ohledem na fakt, že může dojít k bočnímu nárazu automobilu a proto si myslím, že by bylo dobré materiál dveří mechanicky testovat.



Obr. 33 Upravené Lamborghini Aventador společnosti Vitesse AuDessus [22].



Obr. 34 Dveře Lamborghini Aventador [22].

6.14.1. Návrh a postup zkoušení

Vzhledem k tomu, že uhlíková vlákna jsou silně anizotropní, tak si myslím že bude nejlepší provést více typů zkoušek. Jako první bych změřil pevnost v tahu (σ_{pt1}) a tlaku (σ_{pd1}) ve směru vláken a následně pevnost v tahu (σ_{pt2}) a tlaku (σ_{pd2}) kolmo k vláknům. Zkoušky pevnosti v tahu ve směru vláken a kolmo k vláknům bych provedl dle standardu ASTM D3039 [30] a zkoušky pevnosti v tlaku ve směru vláken a kolmo k vláknům dle standardu ASTM D695 [31].

Na tyto zkoušky bude celkem potřeba 4 zkušebních vzorků, které by se vyřezaly z karbonu, který má být použit na část dveří a to přesně tak, aby jejich rozměry odpovídaly daným standardům ASTM. Následně bych provedl jednotlivé zkoušky přesně podle standardizovaných postupů, které jsou napsány výše v kapitole. Nakonec bych podle získaných deformačních diagramů a hodnot rozhodl, zda je měřený karbon vhodný pro cílovou oblast dveří nebo naopak. Pokud by byly dosažené výsledky uspokojující, tak by mohla proběhnout výroba dveří.

7. Současné řešení problematiky

Tato část práce se bude zabývat analýzou současného řešení užití kompozitních materiálů a jejich mechanického testování u konkrétních příkladů, které se budou týkat zejména společností Boeing, Airbus a Lamborghini.

7.1. Boeing 737

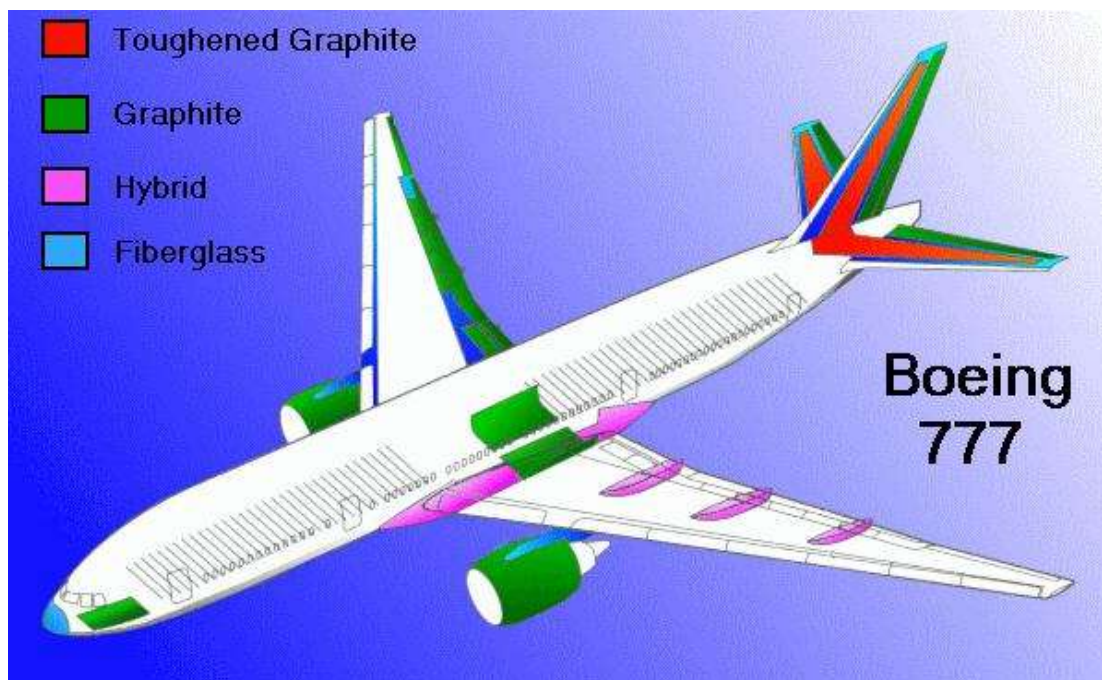
Model 737 je jediné úzkotrupé dopravní letadlo od společnosti Boeing, které je dnes společností vyráběno ve variantách -600, -700, -800, -900. Modernizovaná verze s novými motory – Boeing 737 MAX by měl přijít na trh letecké dopravy během roku 2017. Letoun reprezentuje vysokou úroveň technologie včetně výrazného uplatnění moderních kompozitních materiálů a také využití počítačových systémů, které usnadňují ovládání letounu. Modelová řada letounu 737-800 je na obr. 35 [23].



Obr. 35 Boeing 737-800 [23].

7.2. Boeing 777

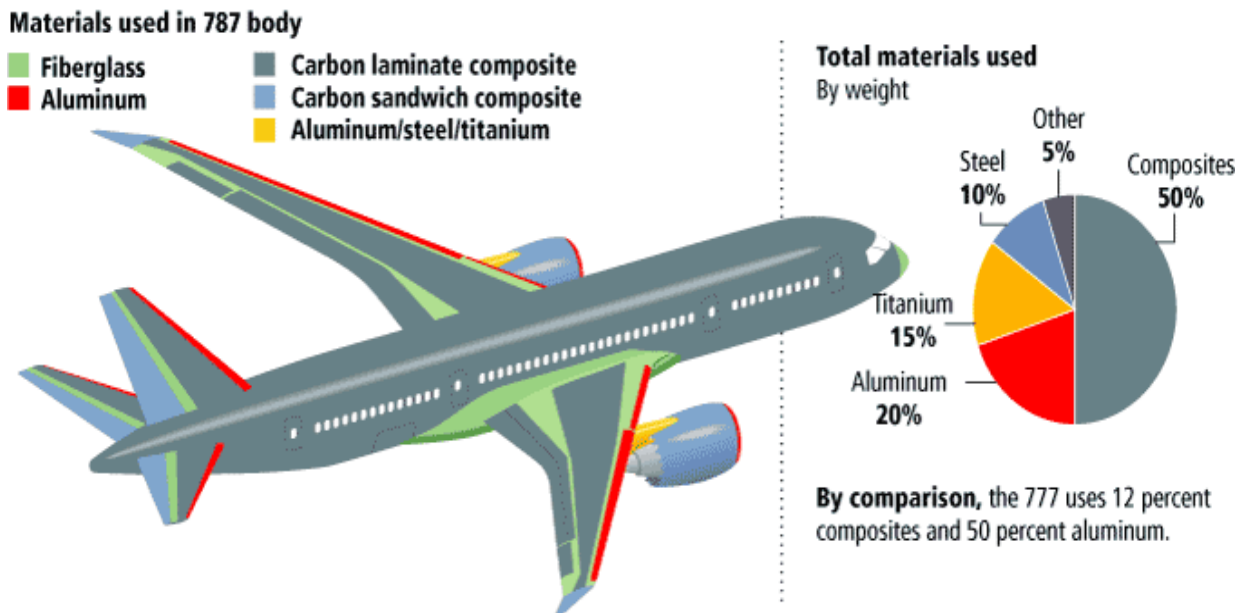
Dalším významným letounem, kde se používají kompozitní materiály je Boeing 777. Schéma využití kompozitů je na obr. 36 na další stránce.



Obr. 36 Letoun Boeing 777, Toughened Graphite — tvrzené uhlíkové vlákno, Graphite — uhlíkové vlákno, Hybrid — hybridní tkaniny, Fiberglass — skelné vlákno [24].

7.3. Boeing 787 Dreamliner

Boeing 787 Dreamliner se řadí mezi dvoumotorové, proudové dopravní letadla. Tento typ společnosti Boeing má konkurovat typům Airbus A350 a Airbus A330. V konstrukci modelu 787 Dreamliner je místo tradičních kovů (nejčastěji hliník a jeho slitiny) použito ve velké míře uhlíkových vláken. Design představuje lehkou konstrukci. Boeing uvádí materiál co do hmotnosti 50% kompozitu, 20% hliníku, 15% titanu, 10% oceli a 10% jiných materiálů. Přehled o použitých materiálech a o důležitosti uhlíkových vláken v tomto typu dopravního letounu můžeme vidět na obr. 31 pod textem. U nového Boeingu 787 Dreamlineru již podíl kompozitů ve dveřích přesahuje 50 %, kompozitová je celá jejich nosná konstrukce. Je přitom třeba říci, že dveře jsou poměrně komplikované, protože patří do přetlakové části trupu, která je zároveň pohyblivá, a musí tedy opakovaně dobře těsnit. Na dveře přitom působí velké síly – až kolem 10 tun. Přehled o použitých materiálech a o důležitosti uhlíkových vláken v tomto typu dopravního letounu můžeme vidět na obr. 37 na následující stránce [25].



Obr. 37 Přehled užitých materiálů na modelu Boeingu 787 Dreamliner [26].

7.4. Používané metody mechanického testování

Výše uvedené kompozitní materiály použité u daných typů letounů společnosti Boeing se běžně musí nechávat mechanicky testovat. K tomuto účelu mohou dobře sloužit mechanické zkoušky dle norem ASTM. Boeing dlouhodobě spolupracuje s řadou laboratoří, které se zabývají testováním kompozitů. Jednou z nich je společnost Westmoreland Mechanical Testing and Research sídlící v Youngstown, PA USA. Tyto laboratoře mají široké portfolio norem dle ASTM. Postupy mechanického testování dle těchto norem je popsáno v předchozí kapitole. Podle mého názoru mezi asi nejčastěji používanými mechanickými testy dle ASTM pro kompozity použité ve výše uvedených letounech patří:

- ASTM D 3039
- ASTM D 695
- ASTM D 790
- ASTM D 6272
- ASTM D 638

Na základě dobrých výsledků mechanického testování se může začít vyrábět samotný díl letounu [29] [30] [31] [32] [33] [41].

7.5. Lamborghini Aventador

Lamborghini Aventador LP700-4 je vůz značky Lamborghini, který se stal nástupcem vozu Lamborghini Murciélago. Vůz pohání dvanáctiválec zcela nové konstrukce o výkonu 515 kW/700 koňských sil. Monokok automobilu je vyroben z karbonem vyztuženého plastu CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic). Samotný monokok dle Lamborghini váží jen 147,5 kilogramů, zatímco hmotnost celého skeletu karoserie je 229,5 kg. Torzní tuhost karbonové vany je 35000 Nm/rad. Vysoká tuhost je důležitá pro pasivní bezpečnost, má ale také pomoci perfektnímu řízení a zpětné vazbě. Monokok je na obr. 38, 39 [27].



Obr. 38 Karbonový monokok Lamborghini Aventador [28].



Obr. 39 Karbonový monokok Lamborghini Aventador usazený na podvozku [28].

Karbonový monokok se vyrábí na pěti linkách. Na první se vyrábějí předimpregnované kompozity, které se vyznačují vysokou pevností a kvalitní povrchovou úpravou. Druhá linka pracuje na výrobě epoxidové pryskyřice pro vyšší tuhost a tlumení hluku a vibrací. Třetí linka využívá patentovaný proces RTM, díky kterému jsou uhlíková vlákna tvarována za nízkých teplot a minimálního tlaku. Předimpregnované kompozity a pěna z epoxidové pryskyřice jsou zde zakomponovány do struktury. Čtvrtá část linky má za úkol kompletovat celý monokok a měřit jej. Na závěr jsou k monokoku přimontovány přední a zadní pomocné rámy, které jsou z hliníku. Poté může monokok na montážní linku [27].

7.6. Používané metody mechanického testování

Lamborghini na vývoji a testování uhlíkových vláken spolupracuje společně s Boeingem, takže používá podobné postupy. Rovněž zde mohou být použity mechanické zkoušky dle standardů ASTM, které jsou popsány výše v práci. Vedle Boeingu a vlastního vývojového centra je dalším z partnerů Advanced Composite Structures Laboratory, které sídlí v Seattlu na Washingtonské univerzitě. Tato laboratoř se zabývá testováním a analýzou nových materiálů pro Lamborghini [27].

Závěr

Tato Bakalářská práce je v podstatě přehledem mechanických zkoušek laminátů dle norem ASTM. Díky práci jsem zjistil, že zkoušky mechanických vlastností mají veliký význam, zvláště u kompozitů, u nichž nepoměrně více záleží na způsobu kladení vrstev, než na samotných mechanických vlastnostech dílčích prvků kompozitu, ale také na samotném tvaru součásti a proto je potřeba metody mechanického testování normalizovat.

V současné době však vznikají v podstatě stejné normy na různých místech na světě pod dohledem různých standardizačních institucí. To je dle mého názoru velká chyba, protože se pak velice špatně porovnávají data a vlastnosti materiálů, které vyhovují stejným standardům v různých zemích a to nám pak může poskytovat podstatně rozlišné výsledky zkoušek. Některé instituce se nicméně snaží o sjednocování některých norem jejich přejímáním.

Cílem této práce bylo v podstatě vytvoření příručky o normovaných zkouškách mechanických vlastností kompozitů. Při tvorbě práce jsem se přesvědčil o důležitosti a významu technických norem, ale také o tom, že by bylo nejlepší, kdyby se normy aspoň částečně sjednotily pro získávání přesných výsledků.

Seznam použité literatury

- [1] ZDENĚK KOŘÍNEK. Webová stránka. *Kompozity*. [online]. Praha, 2016 18.4.2016 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [2] MEISSNER, B., ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.
- [3] BAREŠ, R., A. Kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [4] DAĐOUREK, K. Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. TU v Liberci, 2007, 114 s.
- [5] PTÁČEK, L. Nauka o materiálu. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s ISBN 80-7204-248-32
- [6] LAŠ, V. ÚVOD DO MODELOVÁNÍ V MECHANICE: Mechanika kompozitních materiálů-1. [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/229-umm-6.pdf>
- [7] CHUNG, D. D. L.: *Carbon Fiber Composites*. 1. ed. Newton: Butterworth-Heinemann, 1994. 215 p. ISBN 0-7506-9169-7.
- [8] EHRENSTEIN, W. G. Polymerní kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [9] HRUBÝ, V.: *Přehled materiálového inženýrství*. Vyd. 1. Ostrava: Kovosil, 2010, 220 s. ISBN 978-80-903694-5-0.
- [10] AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L. J.: *Vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987. 294 s.
- [11] HAVEL-COMPOSITES. *Technologie výroby kompozitů* [online]. Česká republika, 2005 [cit. 2016-05-1]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com>
- [12] JANOVEC, J.; CEJP, J.; STEIDL, J. Perspektivní materiály. Praha: Česká technika, 2008.
- [13] AUTO. *StudentCar SCX: Ostravský elektroportáček s 220 kW může na silnici* [online]. Česká republika, 2015 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.auto.cz>
- [14] ELAW. *Nad významem technických norem a jejich praktickým využitím* [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.elaw.cz/>
- [15] INTERTEK [online]. © Intertek Group, 2017 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.intertek.com/>

- [16] *INSTRON* [online]. USA: © Illinois Tool Works, 2017 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.instron.us/en-us/>
- [17] *WyomingTestFixtures* [online]. USA, 2016 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.wyomingtestfixtures.com/index.html>
- [18] *Plastics technology laboratories* [online]. Entire contents ©1996-2017, 2017 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.ptli.com/>
- [19] *TOUCHSTONE RESEARCH LABORATORY* [online]. Triadelphia: ©2004-2015 Copyright Touchstone Research Laboratory, 2017 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.trl.com/>
- [20] *ADMET* [online]. USA: Copyright 2017 ADMET, 2017 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.admet.com/>
- [21] *ASTM INTERNATIONAL* [online]. USA: Copyright © 1996 - 2017 ASTM., 2017 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <https://www.astm.org/>
- [22] GripTV. In: *TOUŽÍTE PO CELÉ KARSERII Z KARBONU? NENÍ PROBLÉM!* [online]. Praha, 2015 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <https://www.griptv.cz/>
- [23] FLYING REVUE. *Boeing 737* [online]. Česká republika, 2016 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.flying-revue.cz>
- [24] AVIATION. *Composite materials* [online]. © The Aviation History On-Line Museum, 2010 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.aviation-history.com/theory/composite.htm>
- [25] FLYMAG. *Boeing 787 Dreamliner* [online]. Česká republika: Copyright © 2009–2015 flyMag, 2016 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.flymag.cz>
- [26] ModernAirliners. *Boeing 787 Dreamliner Specs* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.modernairliners.com>
- [27] AUTO. *Lamborghini Aventador LP700-4: Kompletní informace* [online]. Česká republika: © 2017 Copyright CZECH NEWS CENTER, 2011 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.auto.cz>
- [28] *AUTOBLOG* [online]. Birmingham: © Copyright 2017 AOL, 2011 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.autoblog.com>
- [29] *Westmoreland Mechanical Testing & Research* [online]. USA: © Westmoreland Mechanical Testing & Research, 2017 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.wmtr.com/>

- [30] ASTM D3039 / D3039M-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014
- [31] ASTM Standard D 695-15 (2015), "Compressive Properties of Rigid Plastics," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania (first issued in 1942).
- [32] ASTM Standard D 790-15 (2015), "Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania (first issued in 1970).
- [33] ASTM Standard D 6272-10 (2010), "Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania (first issued in 1998).
- [34] ASTM D7291 / D7291M-15, Standard Test Method for Through-Thickness "Flatwise" Tensile Strength and Elastic Modulus of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Material, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015
- [35] ASTM Standard D6415-06 (2013), "Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania (first published in 1999).
- [36] ASTM Standard D2344-16 (2016), "Short Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates by Short-Beam Method," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania (first published in 1965).
- [37] ASTM D3518 / D3518M-94(2007), Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007
- [38] ASTM Standard D 4255(reapproved 2007), "Guide for Testing In-Plane Shear Properties of Composite Laminates," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania (first published in 1983).
- [39] ASTM Standard D5379-12, "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania (first published in May 1993).

- [40] ASTM D5766 / D5766M-11, Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011
- [41] ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Rozdělení kompozitních materiálů dle geometrie a orientace výztuže [1].</i>	7
<i>Obr. 2 Izometrické a anizometrické částice [6].</i>	8
<i>Obr. 3 Uspořádání vláknové výztuže a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [7].</i>	9
<i>Obr. 4 Základní typy vazeb tkaniny [9].</i>	9
<i>Obr. 5 Schéma výroby skleněných vláken pomocí tažení [3].</i>	11
<i>Obr. 6 Schéma výroby aramidových vláken [8].</i>	13
<i>Obr. 7 Schéma výroby uhlíkových PAN-vláken [8].</i>	15
<i>Obr. 8 Schéma ručního kladení [11].</i>	16
<i>Obr. 9 Schéma tažení [11].</i>	17
<i>Obr. 10 Bombardér B-2 Spirit [1].</i>	18
<i>Obr. 11 Stíhací letoun F-22 [1].</i>	18
<i>Obr. 12 Komerční tiché supersonické letadlo NASA [1].</i>	19
<i>Obr. 13 Hlídkový trimaran Ocean Eagle 43 pro US Navy [1].</i>	19
<i>Obr. 14 "Stealth" loď "M 80 Stiletto" [1].</i>	20
<i>Obr. 15 Bezposádkový člun Piranha [1].</i>	20
<i>Obr. 16 StudentCar SCX [13].</i>	21
<i>Obr. 17 Tesla model X [1].</i>	21
<i>Obr. 18 Auto od Morgan Advanced Materials pro indickou armádu [1].</i>	21
<i>Obr. 19 Část trhacího stroje pro tahovou zkoušku dle ASTM D3039 [16].</i>	25
<i>Obr. 20 Přípravek pro tlakovou zkoušku dle ASTM D695-15 [17].</i>	27
<i>Obr. 21 Přípravek pro tříbodovou ohybovou zkoušku dle ASTM D790-15 [17].</i>	28
<i>Obr. 22 Přípravek pro čtyřbodový ohyb dle ASTM D6272 [17].</i>	29
<i>Obr. 23 Těleso laminátu upnuté pomocí táhla do trhacího stroje [1].</i>	30
<i>Obr. 24 Čtyřbodový ohyb [17].</i>	31
<i>Obr. 25 Přípravek pro ohybovou zkoušku krátkého nosníku [17].</i>	32
<i>Obr. 26 Schéma zkušební tělesa pro dvoukolejnicový test [1].</i>	33
<i>Obr. 27 Zkušební těleso pro dvoukolejnicový test [1].</i>	34
<i>Obr. 28 Přípravek pro tzv. tříkolejnicový test [17].</i>	34
<i>Obr. 29 zkušební těleso pro Iosipescuův test [1].</i>	35

<i>Obr. 30 Přípravek pro Iosipescův test [17].</i>	36
<i>Obr. 31 rozdělení modulů pružnosti a pevnosti dle uspořádání vláken [1].</i>	37
<i>Obr. 32 Zkušební vzorek uchycený do hydraulických čelistí dle ASTM D5766 [15].</i>	38
<i>Obr. 33 Upravené Lamborghini Aventador společnosti Vitesse AuDessus [22].</i>	38
<i>Obr. 34 Dveře Lamborghini Aventador [22].</i>	39
<i>Obr. 35 Boeing 737-800 [23].</i>	40
<i>Obr. 36 Letoun Boeing 777, Toughened Graphite — tvrzené uhlíkové vlákno, Graphite — uhlíkové vlákno, Hybrid — hybridní tkaniny, Fiberglass — skelné vlákno [24].</i>	41
<i>Obr. 37 Přehled užitých materiálů na modelu Boeingu 787 Dreamliner [26].</i>	42
<i>Obr. 38 Karbonový monokok Lamborghini Aventador [28].</i>	43
<i>Obr. 39 Karbonový monokok Lamborghini Aventador usazený na podvozku [28].</i>	44

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Mechanické vlastnosti jednotlivých částic [4].</i>	8
<i>Tabulka 2 Vlastnosti jednosměrně vyztuženého epoxidového laminátu vyztuženého vysokomodulovým aramidovým vláknem [8]</i>	12

Seznam použitých zkratk a symbolů

E_{12}	Modul pružnosti v tahu	[Gpa]
E_{d12}	Modul pružnosti v tlaku	[Gpa]
E_{o12}	Modul pružnosti v ohybu	[Gpa]
G_{12}	Modul pružnosti ve smyku	[Gpa]
σ_{pt12}	Mez pevnosti v tahu	[Mpa]
σ_{pd12}	Mez pevnosti v tlaku	[Mpa]
τ_p	Mez pevnosti ve smyku	[Mpa]
σ_{po}	Mez pevnosti v ohybu	[Mpa]
ν_{12}	Poissonův součinitel	[-]
ν_d	Poissonův součinitel v tlaku	[-]
ε	Poměrné prodloužení	[-]
ε_d	Poměrné zkrácení	[-]
σ	Směrodatná odchylka hl. souboru	[-]
σ_0	Odhad směrodatné odchylky hl. souboru	[-]
u_p	Pravděpodobnostní koeficient	[-]
\bar{E}	Odhad střední hodnoty	[-]
n	Počet měření	[-]
s	Výběrová směrodatná odchylka	[-]
t	Tloušťka tělesa	[mm]
w	Šířka tělesa	[mm]
γ	Smyková deformace	[%]